

UNIVERSIDAD DE CUENCA
FUNDADA EN 1867



FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

**Evaluación del modelo HEC-HMS para la simulación
hidrológica de una cuenca de páramo.**

*Tesis previa a la obtención
del título de Ingeniero Civil*

DIRECTOR:

Ing. Luis Manuel Timbe Castro, PhD

C.I. 030110230-7

AUTOR:

Juan José Cabrera Balarezo

C.I. 010414019-9

Cuenca-Ecuador

Marzo 2017



Resumen

En este estudio se evaluó el desempeño del modelo semi-distribuido HEC-HMS, para la simulación de los procesos de lluvia-escorrentía en una cuenca de páramo. Este análisis se realizó en la parte alta de la cuenca del río Quinuas (sur del Ecuador) ubicado dentro del Parque Nacional El Cajas ($2^{\circ}47'S$, $79^{\circ}11'O$) con un área aproximada de 21.8 km^2 y un gradiente altitudinal que está entre los 3612 y 4400 m s.n.m. Se realizó la calibración y validación en un periodo de 3 años comprendidos entre julio-2013 a junio-2016. Como método principal fue usado el módulo Soil Moisture Accounting (SMA) (Contenido de la Humedad del Suelo). Para la distribución de la lluvia se utilizó los polígonos de Thiessen, mientras que la Evapotranspiración se calculó con el método de Penman-Monteith. Los resultados revelan que (1) el 83% del agua se infiltra en el suelo mientras que solo el 17% es retenido en plantas y la superficie del suelo, (2) el agua es retenida por aproximadamente 42 días antes de llegar al río y (3) que más del 60% del flujo corresponde a flujo sub-superficial.

Palabras clave: HEC-HMS, Calibración, Validación, Páramo, Precipitación, Escorrentía



Abstract

This study evaluated the performance of the semi-distributed model HEC-HMS, for the simulation of rain-runoff processes in a paramo basin. This analysis was carried out in the upper part of the Quinuas River basin (southern Ecuador) located within El Cajas National Park ($2^{\circ} 47' S$, $79^{\circ} 11' O$) with an approximate area of 21.8 km^2 and an altitudinal gradient between 3612 and 4400 m asl. The calibration and validation was performed for a period of 3 years from July-2013 to June-2016. The Soil Moisture Accounting (SMA) module was used as the main method. For the rainfall distribution, the Thiessen polygons were used, while the evapotranspiration was calculated with the Penman-Monteith method. The results reveal that (1) 83% of the water infiltrates the soil while only 17% is retained in plants and the soil surface, (2) the water is retained for approximately 42 days before getting to the river and (3) that more than 60% of the flow corresponds to sub-surface flow.

Key Words: HEC-HMS, Calibration, Validation, Andean Páramo Wetlands, Rainfall, Runoff



Índice General

| | |
|---|----|
| Resumen..... | 2 |
| Abstract | 3 |
| Índice de Figuras | 5 |
| Índice de Tablas..... | 6 |
| Dedicatoria | 9 |
| Agradecimientos | 10 |
| 1. Introducción | 11 |
| 1.1 Antecedentes | 11 |
| 1.2 Alcance | 12 |
| 1.3 Objetivos | 12 |
| 1.4 Justificación | 12 |
| 2. Materiales y Métodos | 14 |
| 2.1 Área de Estudio | 14 |
| 2.2 Información disponible | 16 |
| 2.3 Datos de precipitación y caudal de las estaciones utilizadas..... | 17 |
| 2.4 Cálculo de la evapotranspiración de referencia..... | 18 |
| 2.5 Descripción del Modelo | 19 |
| 2.6 Parametrización | 23 |
| 2.7 Calibración y validación..... | 23 |
| 3. Resultados | 28 |
| 3.1 Lluvia-Caudal | 28 |
| 3.2 Calibración..... | 28 |
| 3.3 Validación | 33 |
| 4. Conclusiones y Recomendaciones | 35 |
| 5. Bibliografía | 37 |



Índice de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1. Perfil de Andosol (izquierda) y Perfil de Histosol (Derecha)..... | 15 |
| Figura 2. Zona de estudio, cobertura vegetal y localización de los sensores de medición. | 16 |
| Figura 3. Precipitación y caudal diario en la cuenca del río Quinuas. | 17 |
| Figura 4. Evapotranspiración de referencia en la cuenca del río Quinuas. | 19 |
| Figura 5. Parámetros del método Contenido de la humedad del suelo en HEC-HMS (Bennett, 1998) | 21 |
| Figura 6. Calibración, flujo simulado vs observado. | 30 |
| Figura 7. Caudal acumulado observado y simulado para el periodo de calibración. | 32 |
| Figura 8. Validación, flujo simulado vs flujo observado. | 33 |
| Figura 9. Caudal acumulado observado y simulado para el periodo de validación. | 34 |



Índice de Tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Parámetros usados para la calibración y rango de valores por defecto. | 24 |
| Tabla 2. Descripción de los parámetros más sensibles. | 25 |
| Tabla 3. Valores referenciales del criterio de Nash-Sutcliffe | 27 |
| Tabla 4. Principales variables hidrológicas en la cuenca del río Quinuas. | 29 |
| Tabla 5. Valores calibrados | 30 |
| Tabla 6. Sensibilidad de parámetros. | 31 |
| Tabla 7. Volúmenes simulados para el periodo de calibración. | 32 |
| Tabla 8. Volúmenes simulados para el periodo de validación. | 34 |



Cláusula de Derechos de Autor

Yo, *Juan José Cabrera Balarezo*, autor de la tesis "Evaluación del modelo HEC-HMS para la simulación hidrológica de una cuenca de páramo", reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Civil. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, marzo de 2017

Juan José Cabrera Balarezo

C.I: 010414019-9



Cláusula de Propiedad Intelectual

Yo, *Juan José Cabrera Balarezo*, autor de la tesis "Evaluación del modelo HEC-HMS para la simulación hidrológica de una cuenca de páramo", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, marzo de 2017

Juan José Cabrera Balarezo

C.I: 010414019-9



Dedicatoria

*Este trabajo se lo dedico a Dios en primer lugar,
a mi esposa Viviana Marcela por ser mi ayuda idónea y
mi amiga incondicional,
a mis padres Juan Oswaldo y María Luisa por haber
confiado en mí y haberme guiado, corregido
y amado siempre,
y a mis hermanas María Claudia y Daniela Salomé.*



Agradecimientos

Un agradecimiento al Proyecto PIC-13-ETAPA-001 " Desarrollo de indicadores hidrológicos funcionales para la evaluación del impacto del cambio global en ecosistemas Andinos" Financiado por la SENESCYT y la Universidad de Cuenca. Un agradecimiento muy sincero principalmente a mí director de tesis el Ing. Luis Timbe y al Ing. Patricio Crespo por todo el apoyo y dirección en la realización de este trabajo. También al equipo de trabajo del Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales de la Universidad de Cuenca por facilitar los datos y recursos necesarios para la elaboración de este trabajo en especial al Ing. Giovanni Mosquera por su oportuna ayuda en varias ocasiones.



1. Introducción

1.1 Antecedentes

El entendimiento y el estudio de la dinámica de los procesos de lluvia-escorrentía son fundamentales para la conservación y mitigación de los cambios del uso del suelo y los impactos del cambio climático (Beniston, 2003).

Los páramos de los Andes, ubicados en su gran parte en América Central y América del Sur en los países de Venezuela, Colombia, Ecuador y Perú entre 11°N-8°S, proporcionan una gran variedad de servicios de ecosistema (Célleri & Feyen, 2009), los más importantes son: proporcionar una gran cantidad de agua limpia todo el año (Wouter Buytaert, Célleri, et al., 2006; Roa-García, Brown, Schreier, & Lavkulich, 2011), regular el flujo y almacenar carbono (Harden et al., 2013), y como un soporte a la biodiversidad endémica (Vuille, 2013). Está particularmente afectado por los controladores del cambio global (Wouter Buytaert, Cuesta-Camacho, & Tobón, 2011; Farley, Bremer, Harden, & Hartsig, 2013) tales como cambios en el uso de suelo y cambio climático.

El páramo normalmente se encuentra en altitudes superiores a los 3500m s.n.m. (Wouter Buytaert, Celleri, Willems, Bièvre, & Wyseure, 2006) y muy pocas veces por debajo de los 2800m s.n.m. (Vásconez & Hofstede, 2006).

Es un ecosistema frágil y susceptible a impactos antropogénicos y cambio climático, esto puede alterar su dinámica afectando negativamente tanto a la biodiversidad como a su capacidad funcional (Erwin, 2009).

El agua originada en el páramo es utilizada por millones de personas y ayuda al desarrollo del sustento socio-económico de ciudades ubicadas en los Andes como son Mérida, Bogotá, Cuenca y Quito (W. Buytaert & Bievre, 2012).

En el Ecuador el páramo cubre aproximadamente el 10% de la superficie terrestre y el agua se usa para la generación de energía eléctrica, irrigación, usos



industriales, como para el consumo humano (Wouter Buytaert, Célleri, et al., 2006; Célleri & Feyen, 2009).

1.2 Alcance

En este estudio se prevé la modelación hidrológica de la parte alta de la cuenca del río Quinuas (sur del Ecuador) que vierte sus aguas a la cuenca del río Amazonas. El estudio se realizará para un periodo de 3 años, comprendidos entre julio-2013 a junio-2016. El análisis será calibrado para el periodo comprendido entre julio-2013 a diciembre-2014 y validado para el periodo julio-2015 a junio-2016.

1.3 Objetivos

El objetivo principal de este estudio es evaluar el desempeño de un modelo semi-distribuido para la simulación de los procesos de lluvia-escorrentía en una cuenca de páramo.

Los objetivos específicos son los siguientes:

- a) Análisis de los datos hidrometeorológicos y/o relleno de datos faltantes.
- b) Calibrar y validar el modelo hidrológico HEC-HMS en la cuenca del río Quinuas.
- c) Determinar la precisión del modelo en la simulación de los componentes del flujo: escorrentía superficial y flujo base.

1.4 Justificación

La predicción de caudales en microcuencas es muy importante para la planificación de proyectos, donde se necesita conocer de cuánta agua se dispone y cómo es la distribución temporal de la misma. Los caudales máximos,



Universidad de Cuenca

mínimos y medios son importantes para el dimensionamiento de las obras y diseño de operación de las mismas en proyectos tales como sistemas de riego, dotación de agua potable, entre otros. Las predicciones hidrológicas repercuten en el costo y seguridad de la obra a realizarse.

La calibración y validación del modelo HEC-HMS, junto con el conocimiento de los componentes del flujo serán útiles para planificación e implementación de obras de ingeniería. El caudal del flujo base es un parámetro muy importante, por ejemplo, para el diseño y planificación de sistemas de agua potable en la zona.



2. Materiales y Métodos

2.1 Área de Estudio

El estudio fue realizado en la parte alta de la cuenca del río Quinuas (sur del Ecuador) que vierte sus aguas a la cuenca del río Amazonas, y está ubicado dentro del Parque Nacional El Cajas ($2^{\circ}47'S$, $79^{\circ}11'O$), declarado como una reserva de la biosfera en el mundo por la UNESCO en 2013. La parte alta de la cuenca del río Quinuas tiene un área aproximada de 21.8 km² y un gradiente altitudinal que está entre los 3612 y 4400 m s.n.m. Los principales grupos de suelos encontrados en el área de estudio son los Andosoles e Histosoles. Un perfil característico de estos suelos se puede observar en la figura 1.

Los andosoles se forman a partir de material volcánico con un desarrollo relativamente pequeño del horizonte: formados por un horizonte Ah oscuro con alto contenido carbónico orgánico sobre un horizonte mineral C que es generalmente alto en arcilla (Wouter Buytaert, Deckers, & Wyseure, 2006; Mosquera, Lazo, Célleri, Wilcox, & Crespo, 2015).

Los histosoles consisten en un horizonte H altamente orgánico, son suelos localizados principalmente en el fondo de los valles, pueden tener varios metros de profundidad y permanecer saturados durante la mayor parte del año (Wouter Buytaert & Beven, 2011; IUSS Working Group WRB, 2014; Mosquera et al., 2015).

Tanto los andosoles como los histosoles son húmicos y ácidos, tiene una estructura extremadamente porosa con una capacidad de retención de agua muy alta y baja densidad aparente (Wouter Buytaert, Deckers, et al., 2006; Mosquera et al., 2015; Podwojewski, Poulenard, Zambrana, & Hofstede, 2002; J. Poulenard, Michel, Bartoli, Portal, & Podwojewski, 2004; Jérôme Poulenard, Podwojewski, Janeau, & Collinet, 2001). La vegetación que prevalece es el



Universidad de Cuenca

pajonal (*Calamagrostis* sp. y *Festuca* sp., para los Andosoles) y plantas de cojín (*Plantago rigida*, *Xenophyllum humile*, *Azorella* spp., para los Histosoles)(Mosquera et al., 2015).



Figura 1. Perfil de Andosol (izquierda) y Perfil de Histosol (Derecha)

Fuente. Pablo Borja.

El clima del sitio de estudio se encuentra influenciado mayormente por las masas de aire de la cuenca del Amazonas, en menor intensidad por la Zona de Convergencia Intertropical y en pocos casos por las masas de aire del oeste (influencia de la corriente de Humboldt). La lluvia promedio anual varía entre 991 y 1244mm. Las temperaturas máximas llegan hasta los 18.57°C y las mínimas con valores de hasta -2.85°C, y una temperatura promedio de 6.81°C. La humedad relativa promedio mensual es de 91.28%. La radiación solar y la temperatura son relativamente constantes a lo largo del año, pero varían diariamente de forma extrema y bien marcada (Córdova et al., 2016; Córdova, Carrillo-Rojas, Crespo, Wilcox, & Célleri, 2015).

2.2 Información disponible

La cuenca está densamente monitoreada por el Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales de la Universidad de Cuenca (figura 2) con propósitos de investigación ambiental, meteorológica, hidrométrico y de calidad de agua. El caudal y precipitación están continuamente monitoreados desde octubre 2012.

Para este estudio se contó con información diaria completa de precipitación, caudal, humedad relativa, velocidad del viento, radiación solar y temperatura máxima, mínima y media para el período julio 2013-junio 2016. Estas variables fueron medidas con sensores de precipitación marca Davis/Texas/Onset, y sensores meteorológicos marca Campbell Sci/HOBO, con una frecuencia de 5 minutos.

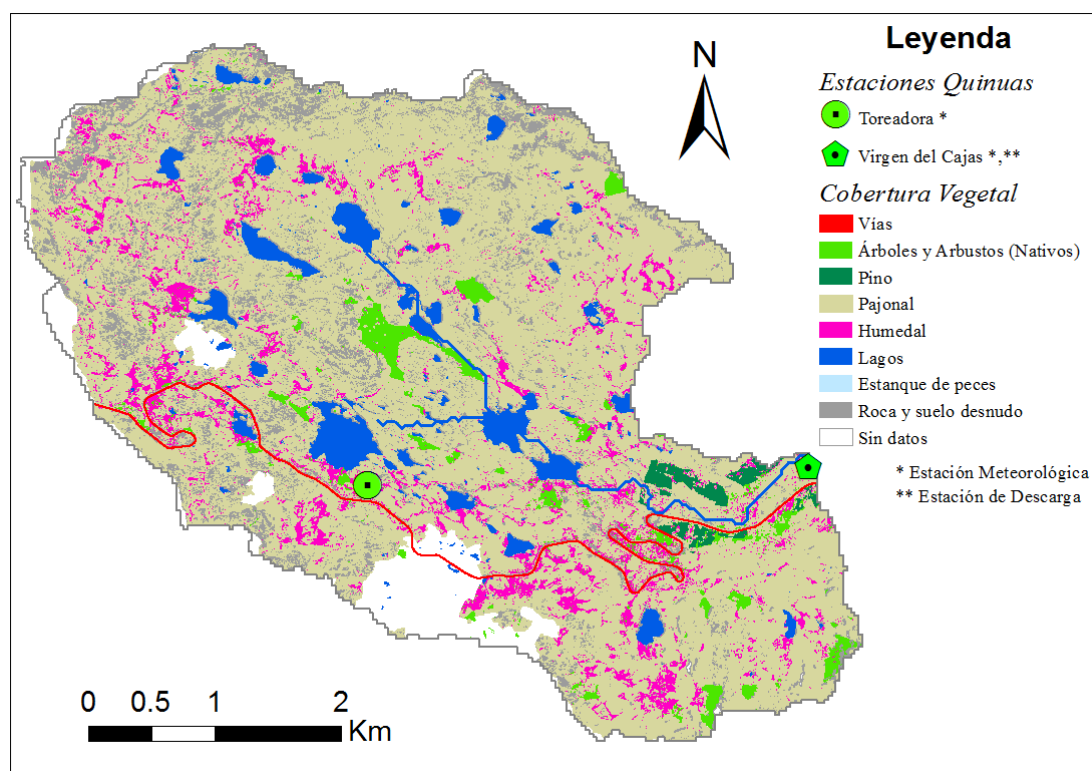


Figura 2. Zona de estudio, cobertura vegetal y localización de los sensores de medición.



Se contó con dos estaciones meteorológicas: Toreadora y la Virgen del Cajas y una estación de caudal: la Virgen del Cajas ubicada a una altura de 3612m s.n.m.

2.3 Datos de precipitación y caudal de las estaciones utilizadas

Para calcular la precipitación promedio de la cuenca se usó el método de Thiessen (Thiessen, 1911). En la figura 3 se presenta la precipitación ponderada (mm) y el caudal ($l s^{-1}$), faltando datos de caudal en el mes de junio-2015, por esta razón el periodo de validación seleccionado fue julio-2015 a junio-2016. Las precipitaciones y caudales observados varían entre $0 mm$ a $22.1 mm$ y $75.1 l s^{-1}$ a $1460.6 l s^{-1}$ respectivamente.

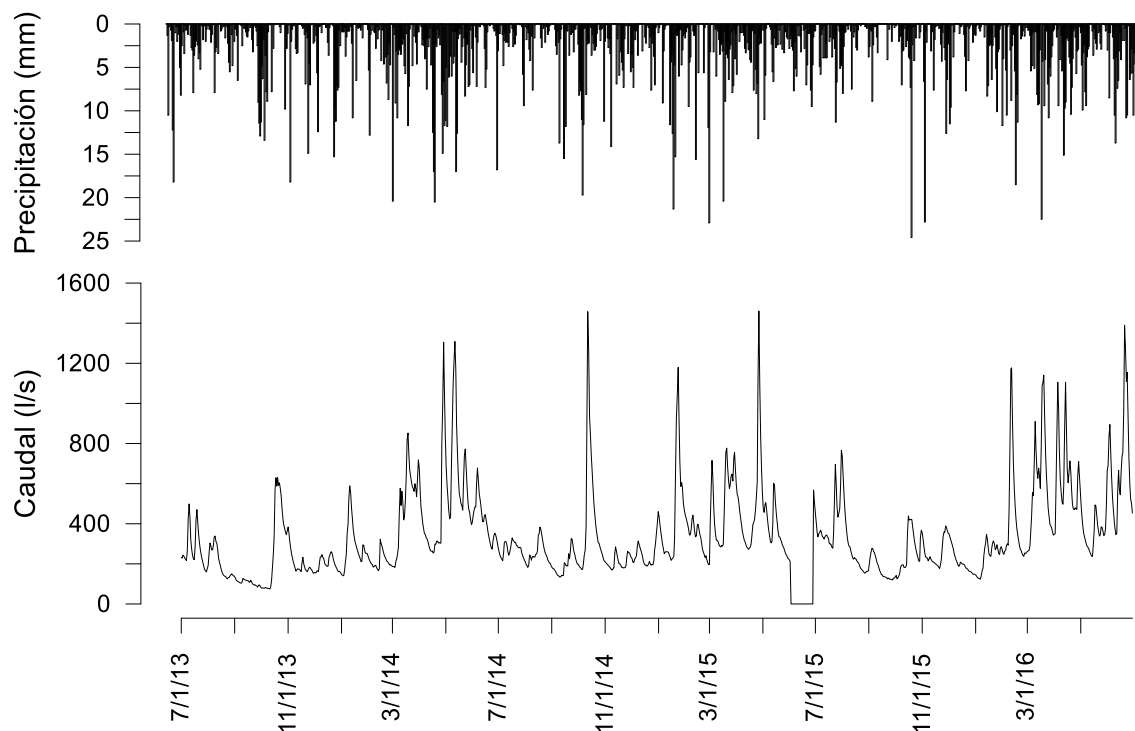


Figura 3. Precipitación y caudal diario en la cuenca del río Quinuas.



2.4 Cálculo de la evapotranspiración de referencia

Para el cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET_o) se utilizó la fórmula de Penman-Monteith recomendada por la FAO (Allen, Pereira, Raes, Smith, & Ab, 1998).

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

Donde

ET_o Evapotranspiración de referencia [mm día⁻¹]

R_n Radiación neta [MJ m² día⁻¹]

G Flujo de calor en el suelo [MJ m² día⁻¹]

T Temperatura media del aire a 2 m de altura [°C]

U₂ Velocidad del viento a 2 m de altura [m s⁻¹]

e_s Presión de vapor de saturación [kPa]

e_a Presión real de vapor [kPa]

e_s - e_a Déficit de presión de vapor [kPa]

Δ Pendiente de la curva de presión de vapor [kPa °C⁻¹]

γ Constante psicrométrica [kPa °C⁻¹]

Se usó el software ETo calculator (Raes, 2009) para el cálculo de la ETo para el periodo seleccionado en este estudio. Las variables usadas fueron: temperaturas máximas, mínimas y medias, velocidad del viento a 2 m de altura, humedades relativas máximas, mínimas y medias, radiación neta y radiación solar.



La figura 4 presenta la ETo mensual calculada para la zona de estudio, la cual varía entre 41.6 mm a 81.2 mm.

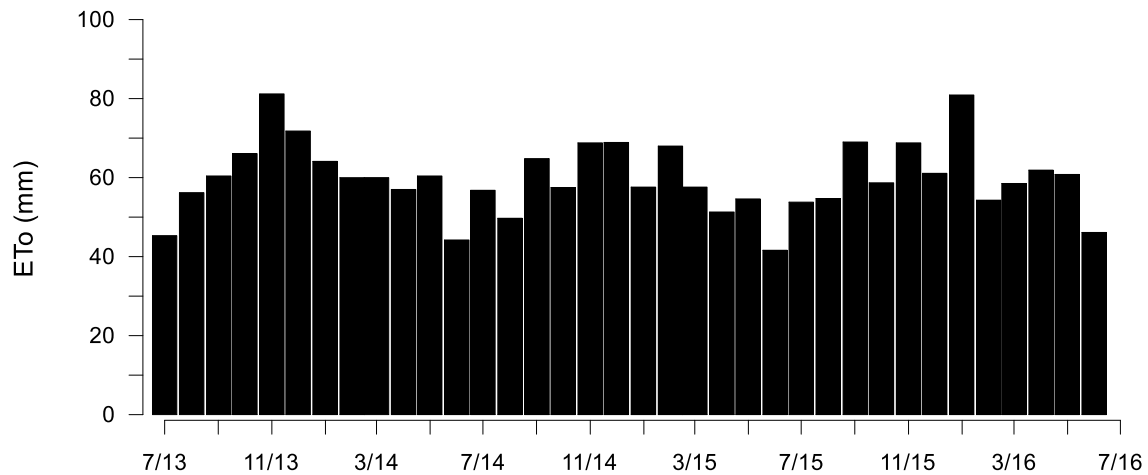


Figura 4. Evapotranspiración de referencia en la cuenca del río Quinuas.

2.5 Descripción del Modelo

En este estudio se usó el software de modelación hidrológica HEC-HMS versión 4.2 diseñado por los ingenieros de las fuerzas armadas de los Estados Unidos (Scharffenberg, 2015). El programa está diseñado para simular los procesos hidrológicos. La conceptualización del modelo inicia con la precipitación, ésta cae sobre la vegetación, la superficie terrestre y los cuerpos de agua de la cuenca. Gran parte del agua que cae como precipitación regresa a la atmósfera por evaporación de la vegetación, superficies de la tierra y cuerpos de agua y por transpiración de la vegetación.

Parte de la precipitación que cayó en la vegetación descienden a través de los tallos, ramas, troncos hasta la superficie terrestre, donde se une a la precipitación que cayó directamente sobre la superficie. Allí el agua puede estancarse, y dependiendo del tipo de suelo, cobertura del suelo, humedad antecedente y otras propiedades de la cuenca, una porción puede infiltrarse.



Esta agua infiltrada se almacena temporalmente en las capas superiores, parcialmente saturadas del suelo. Desde allí, sube a la superficie nuevamente por acción capilar, se mueve horizontalmente como flujo intermedio justo debajo de la superficie, o se infiltra verticalmente al acuífero subterráneo debajo de la cuenca. El flujo intermedio finalmente se mueve hacia el canal de la corriente.

El agua en el acuífero se mueve lentamente, pero eventualmente, puede retornar a los cauces como flujo base. El agua que no se estanca ni se infiltra se mueve por escorrentía superficial (flujo terrestre) hasta el cauce de la corriente. El cauce de la corriente es el punto de combinación para el flujo superficial: (i) la precipitación que cae directamente sobre los cuerpos de agua en la cuenca, (ii) el flujo intermedio, y (iii) el flujo base. Por lo tanto, el caudal resultante es el caudal total de la cuenca (Feldman, 2000).

HEC-HMS también incluye procesos necesarios para la simulación continua como son la evapotranspiración, derretimiento de nieve y el balance de la humedad del suelo.

HEC-HMS utiliza 4 módulos o etapas: pérdidas, transformación, flujo base y tránsito de flujo. Para este estudio se usaron las tres primeras ya que la última no fue necesaria, porque en este caso no fue necesario realizar ningún tipo de tránsito a través de un canal o cauce.

Para el módulo de “Pérdidas” se usaron el método de canopy simple, el método de superficie simple y el contenido de la humedad del suelo.

El proceso conceptual del método del contenido de la humedad del suelo se puede revisar en la figura 5, el mismo que fue usado en la presente investigación.

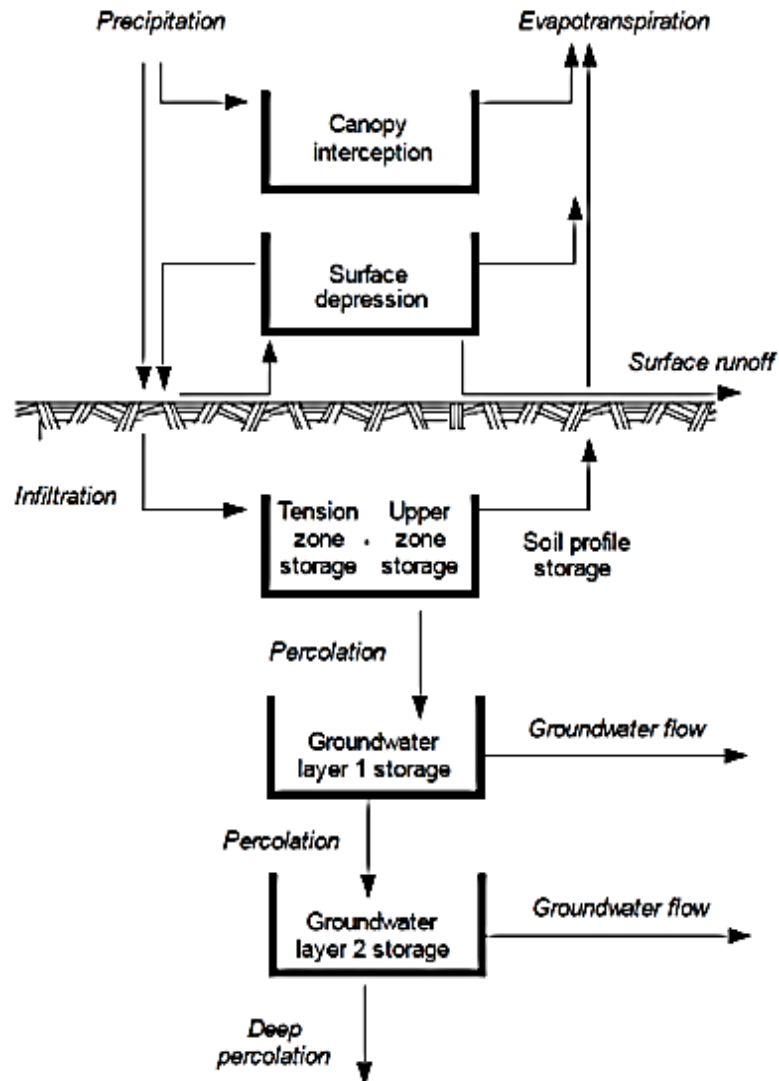


Figura 5. Parámetros del método Contenido de la humedad del suelo en HEC-HMS (Bennett, 1998)

El proceso inicia con la precipitación, parte es interceptada en árboles, arbustos y pastos, y no llega a la superficie del suelo. El agua que no es retenida pasa al almacenaje superficial, representando todas las depresiones superficiales. Por infiltración pasa al almacenaje del perfil del suelo, esto representa el agua almacenada en la capa superior del suelo, de aquí el agua



es extraída por infiltración hacia la primera capa de aguas subterráneas o por evapotranspiración.

Las capas de aguas subterráneas en el contenido de la humedad del suelo representan los procesos horizontales de flujo intermedio. El modelo puede incluir una o dos capas de aguas subterráneas. Las capas de las aguas subterráneas no están diseñadas para representar procesos de acuíferos profundos, su intención es representar procesos horizontales de flujo intermedio poco profundo (Bennett, 1998).

Como método de transformación se utilizó el método del hidrograma unitario de Clark, el cual representa dos procesos críticos en la transformación de la precipitación neta en caudal. La traslación: el movimiento del exceso de agua desde su origen a través de la cuenca hasta la salida de la cuenca y la atenuación: reducción de la magnitud de la descarga como exceso almacenado a través de la cuenca. Entonces, el método consiste en transitar la precipitación neta a través de la cuenca en un intervalo de tiempo y regular este tránsito por medio de un reservorio lineal. Para esto es necesario dos parámetros: el tiempo de concentración y el coeficiente de almacenamiento (Feldman, 2000).

Como método de flujo base se utilizó el método de reservorios lineales que se usa en conjunto con el modelo de contenido de la humedad del suelo. Este modelo de flujo base simula el almacenaje y movimiento del flujo sub-superficial como almacenaje y movimiento a través de reservorios. Los reservorios son lineales: la salida de cada paso de tiempo en la simulación es una función lineal del promedio de almacenamiento durante ese paso de tiempo. Matemáticamente es idéntico a la manera en que trabaja el método del hidrograma unitario de Clark (Feldman, 2000).



2.6 Parametrización

Para representar todo el modelo se necesitaron trece parámetros y cinco condiciones iniciales que se detallan en la tabla 1.

De los trece parámetros doce fueron calibrados, el porcentaje de zonas impermeables de la cuenca (“impervious”) no fue calibrado ya que en la zona de estudio no se tienen superficies impermeables (es insignificante); por lo tanto, se asignó el valor de cero para éste parámetro. Ninguna condición inicial fue calibrada, en su lugar se tomaron los datos de lluvia y caudal desde el 23-ago-2013 hasta el 11-oct-2013 repitiéndolo cinco veces previo al tiempo de calibración, dando así al programa un período de calentamiento “warmup” para que se ajusten las condiciones iniciales y no influyan en los resultados al inicio de la calibración.

2.7 Calibración y validación

La calibración es esencial en la modelación hidrológica, este proceso permite ajustar los parámetros para que la simulación de los hidrogramas reproduzca satisfactoriamente los registrados observados en la cuenca.

El periodo seleccionado para la calibración fue de julio-2013 a diciembre-2014. Para la calibración primero se hizo una aproximación a los flujos base, es decir, al inicio se calibraron los parámetros que controlan el flujo base que en este caso son: GW 1 Storage, GW 1 Percolation y GW 1 Coefficient; junto con Soil Percolation que determina la cantidad de agua entrante para el agua subterránea. A continuación, se procedió a calibrar los demás parámetros, ya con una idea clara de un rango de valores de los parámetros que controlan el flujo base.



Universidad de Cuenca

Tabla 1. Parámetros usados para la calibración y rango de valores por defecto.

| | PARÁMETROS | CONDICIONES INICIALES | SIGNIFICADO | RANGOS DE VARIACIÓN POR DEFECTO (PARÁMETROS) |
|------------------|-------------------------------|-----------------------|--|--|
| CANOPY | Max Storage (mm) | Initial Storage (%) | Almacenaje máximo, Almacenaje inicial | 0.001 - 1500 |
| SURFACE | Max Storage (mm) | Initial Storage (%) | Almacenaje máximo, Almacenaje inicial | 0.001 - 1500 |
| LOSS | Max infiltration (mm/hr) | Soil (%) | Infiltración máxima, Suelo | 0.01 - 500 |
| | Impervious (%) | Groundwater 1 (%) | Zonas impermeables, agua subterránea 1 | 0 - 100 |
| | Soil Storage (mm) | | Almacenaje del suelo | 0.01 - 1500 |
| | Tension Storage (mm) | | Almacenaje en zona de tensión | 0.01 - 1500 |
| | Soil Percolation (mm/hr) | | Percolación del suelo | 0.01 - 500 |
| | GW 1 Storage (m) | | Almacenaje en agua subterránea 1 | 0.01 - 1500 |
| | GW 1 Percolation (mm/hr) | | Percolación en agua subterránea 1 | 0.01 - 500 |
| | GW 1 Coefficient (hr) | | Coefficiente en agua subterránea 1 | 0.01 - 10000 |
| TRANSFORM | Time of Concentration (hr) | | Tiempo de concentración | 0.0167 - 1000 |
| | Storage Coefficient (hr) | | Coefficiente de almacenaje | 0.01 - 1000 |
| BASEFLOW | GW 1 Storage Coefficient (hr) | GW 1 Initial (%) | Coefficiente de almacenaje en agua subterránea 1, Cantidad inicial en agua subterránea 1 | 0.01 - 10000 |



En una primera etapa se procedió a realizar la calibración manual (prueba y error) de los parámetros, con el objetivo de evaluar la influencia de cada parámetro en el hidrograma de salida del modelo. Los resultados de este análisis se presentan en la tabla 2., la cual describe los parámetros más sensibles. A continuación, se procedió a realizar una calibración semiautomática, para lo cual se utilizó el módulo “optimization trial” del HEC-HMS. En esta sección se debe elegir un método de búsqueda, una tolerancia, el número máximo de iteraciones y una función objetivo (Feldman, 2000).

Tabla 2. Descripción de los parámetros más sensibles.

| | PARÁMETROS | DESCRIPCIÓN |
|-----------|----------------------------|---|
| LOSS | Max infiltration (mm/hr) | Cambia altura de los picos. Cambia precipitación efectiva. |
| | Soil Storage (mm) | Cambia altura de los picos. Cambia precipitación efectiva. |
| | Soil Percolation (mm/hr) | Cambia precipitación efectiva. |
| | GW 1 Storage (m) | Cambia volumen del flujo base. |
| | GW 1 Percolation (mm/hr) | Cambia altura de los picos. |
| | GW 1 Coefficient (hr) | Cambia volumen del flujo base. |
| TRANSFORM | Time of Concentration (hr) | Cambia la recesión en el hidrograma. |
| | Storage Coefficient (hr) | Cambia la altura de los picos. |

Como método de búsqueda se eligió el algoritmo de gradiente-univariante, el cual hace sucesivas correcciones a los parámetros estimados: si x^k representa el parámetro estimado con la función objetivo $f(x^k)$ en la iteración k , la búsqueda define un nuevo estimado x^{k+1} en la iteración $k+1$ como:

$$x^{k+1} = x^k + \Delta x^k$$



En el cual Δx^k es la corrección del parámetro. El propósito es seleccionar Δx^k para que el valor estimado del parámetro logre minimizar o maximizar la función objetivo. Generalmente esto no se logra en la primera iteración, por lo que la ecuación se aplica repetidas veces. El método del gradiente está basado en la técnica de Newton para encontrar la solución y la función objetivo es aproximada con la siguiente función de Taylor:

$$f(x^{k+1}) = f(x^k) + (x^{k+1} - x^k) \frac{df(x^k)}{dx} + \frac{(x^{k+1} - x^k)^2}{2} \frac{d^2f(x^k)}{dx^2}$$

Para la tolerancia se tomó el valor de 0.0001 y el número máximo de iteraciones fue de 1000.

Como función objetivo se utilizó la eficiencia de Nash-Sutcliffe (E), que se estima con la siguiente ecuación:

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{ci} - Q_{oi})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - \bar{Q}_o)^2}$$

Donde E es el coeficiente adimensional, Q_{ci} es el caudal calculado en el día i (m^3/s), Q_{oi} es el caudal observado en el día i (m^3/s), y \bar{Q}_o es el promedio de los caudales observados en los n días (m^3/s).

Este coeficiente muestra el nivel de ajuste entre los caudales observados y los caudales modelados. Cuando $E = 1$ la simulación es perfecta, esto significa que la varianza de errores es igual a cero; cuando $E = 0$, la simulación da como resultado valores semejantes al promedio de los caudales, y cuando $E < 0$ nos indica que el promedio de los caudales es una mejor solución que la obtenida por el modelo. Algunos valores referenciales del criterio de Nash-Sutcliffe se muestran en la tabla 3.



Tabla 3. Valores referenciales del criterio de Nash-Sutcliffe

| E | AJUSTE |
|-----------|---------------|
| <0.2 | Insuficiente |
| 0.2 - 0.4 | Satisfactorio |
| 0.4 - 0.6 | Bueno |
| 0.6 - 0.8 | Muy bueno |
| >0.8 | Excelente |

Fuente. (Molnar, 2011)

La validación es sumamente importante, ya que permite asegurar que los parámetros obtenidos en la calibración son válidos para otros eventos o series de tiempo. En la validación se utiliza un período de datos independiente, no empleado en la calibración. En este estudio la validación se realiza para el período julio 2015 - junio 2016 con los parámetros calibrados previamente.



3. Resultados

3.1 Lluvia-Caudal

Un resumen de las características de lluvia-escorrentía para el periodo de estudio (julio-2013 a junio-2016) se presenta en la tabla 4.

Durante este periodo, la lluvia varía entre 1023 a 1079 $mm\ año^{-1}$. Los coeficientes de escorrentía varían entre 0.45 a 0.51.

Los caudales específicos varían entre 14.6 a 17.3 $l\ s^{-1}\ km^{-2}$. Teniendo caudales mínimos de 3.4 hasta caudales máximos de 66.9 $l\ s^{-1}\ km^{-2}$.

3.2 Calibración

El periodo seleccionado para la calibración fue de julio-2013 a diciembre-2014 obteniendo una E de 0.65 y un error del 0.74% en cuanto a volumen de descarga.

El flujo base fue el primero en ser calibrado, los parámetros que lo controlan son: GW 1 Storage, GW 1 Percolation y GW 1 Coefficient. El caudal del flujo base mínimo es de 80 $l\ s^{-1}$ y el máximo de 385 $l\ s^{-1}$ con una media de 200 $l\ s^{-1}$. Luego se calibró la escorrentía superficial con el resto de parámetros.

El caudal por escorrentía superficial mínimo es de 0 $l\ s^{-1}$ y el máximo de 1027 $l\ s^{-1}$ con una media de 115 $l\ s^{-1}$ como se observa en la figura 6.



Universidad de Cuenca

Tabla 4. Principales variables hidrológicas en la cuenca del río Quinuas.

| Periodo | Precipitación (mm yr-1) | Total Escorrentía (mm yr-1) | Coeficiente de Escorrentía | Caudal Específico (l s-1 km-2) | Caudales como frecuencias de no excedencia (l s-1 km-2) | | | | | | |
|------------------------|----------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|--|-----|------|------|------|------|------|
| | | | | | Qmin | Q10 | Q30 | Q50 | Q70 | Q90 | Qmax |
| Jul2013-Jun2014 | 1030 | 462 | 0.45 | 14.6 | 3.4 | 5.4 | 8.5 | 11.6 | 16.5 | 27 | 60 |
| Jul2014-Jun2015 | 1023 | 522 | 0.51 | 16.6 | 6.1 | 8.7 | 10.9 | 13.3 | 18.2 | 28.3 | 66.9 |
| Jul2015-Jun2016 | 1079 | 546 | 0.51 | 17.3 | 5.5 | 7.2 | 10.6 | 13.8 | 18.9 | 31.6 | 63.7 |

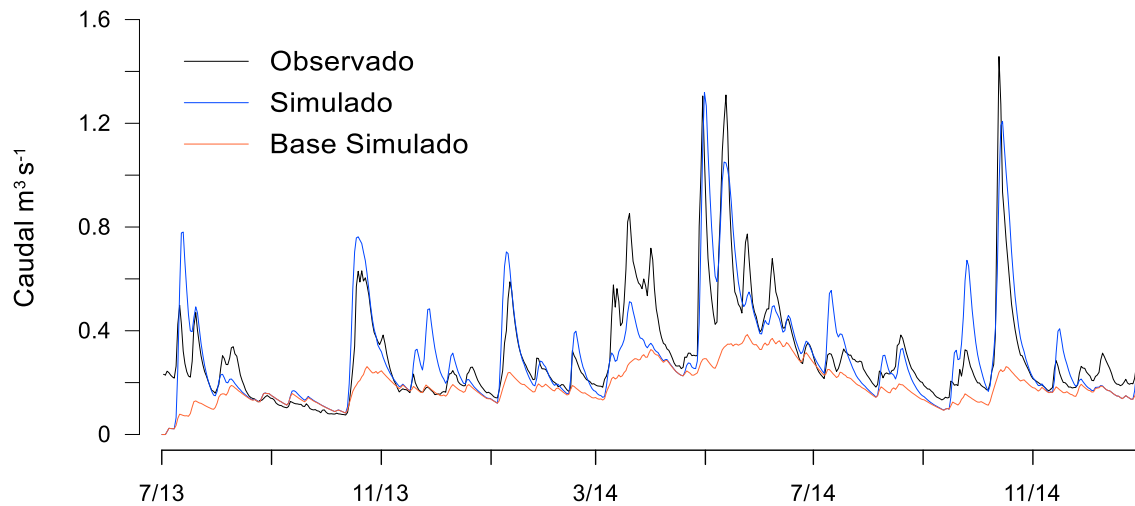


Figura 6. Calibración, flujo simulado vs observado.

Los valores finales de los parámetros luego de la calibración se muestran en la tabla 5.

Tabla 5. Valores calibrados

| | Parámetros | Valores Calibrados |
|------------------|-------------------------------|--------------------|
| Canopy | Max Storage (mm) | 0.06 |
| Surface | Max Storage (mm) | 0.85 |
| Loss | Max infiltration (mm/hr) | 0.92 |
| | Impervious (%) | 0 |
| | Soil Storage (mm) | 0.99 |
| | Tension Storage (mm) | 0.78 |
| | Soil Percolation (mm/hr) | 15 |
| Transform | GW 1 Storage (m) | 932 |
| | GW 1 Percolation (mm/hr) | 0.34 |
| | GW 1 Coefficient (hr) | 1001 |
| | Time of Concentration (hr) | 80 |
| Baseflow | Storage Coefficient (hr) | 117 |
| | GW 1 Storage Coefficient (hr) | 1.33 |



La mayor parte del agua (83%) infiltra en el suelo gracias a su gran capacidad de percolación y las bajas intensidades de lluvia. A demás las intensidades de lluvia son menores a las tasas de infiltración del suelo, congruente con otras zonas de páramo (Wouter Buytaert, Céleri, et al., 2006).

El agua es retenida en el suelo por aproximadamente 42 días antes de salir al cauce natural. El 62% del flujo total corresponde a flujo sub-superficial o flujo base, resultado que se ratifica con otros estudios de páramo donde la mayoría del flujo es flujo sub-superficial (P. Crespo et al., 2010; P. J. Crespo et al., 2011; Mosquera, Céleri, et al., 2016; Mosquera, Segura, et al., 2016).

Los parámetros más sensibles y más determinantes fueron: Max infiltration, Soil Storage, Tension Storage, GW 1 Storage, GW 1 Percolation y GW 1 Coefficient. Cabe destacar que el parámetro Soil Percolation es muy poco o nada sensible para valores mayores a 0.6. Los valores de sensibilidad se muestran en la tabla 6. Los parámetros con valores cercanos a cero son poco o nada sensibles, y mientras más se alejen del cero (valor positivo o negativo) nos indica que dichos parámetros son más sensibles.

Tabla 6. Sensibilidad de parámetros.

| Parámetros | Sensibilidad en la función objetivo |
|--------------------------|--|
| Max infiltration (mm/hr) | -0.55 |
| Soil Storage (mm) | -1.17 |
| Tension Storage (mm) | 2.81 |
| Soil Percolation (mm/hr) | 0 |
| GW 1 Storage (m) | -0.27 |
| GW 1 Percolation (mm/hr) | 0.27 |
| GW 1 Coefficient (hr) | -0.3 |



En cuanto a volúmenes simulados se tiene que la infiltración corresponde al 83% del total de lluvia mientras que lo que se retiene en la superficie de plantas y suelo es solo el 17%. La escorrentía superficial corresponde al 38% del flujo total mientras que el flujo base es el 62% como se muestra en la tabla 7. El coeficiente de escorrentía simulado es de 0.45, que coincide con el observado.

Tabla 7. Volúmenes simulados para el periodo de calibración.

| | | | |
|-----------------------------------|-------------|---|-------------|
| Volumen Precipitación (mm) | 1473 | Volumen de Descarga (mm) | 663 |
| Volumen de infiltración (mm) | 1220 | Volumen de Escorrentía Superficial (mm) | 251 |
| Volumen de retención (mm) | 253 | Volumen de Flujo Base (mm) | 412 |
| Coeficiente de Escorrentía | | | 0.45 |

En la figura 7 observamos que el caudal acumulado simulado es similar al caudal acumulado observado por lo que sabemos que a través del tiempo se están descargando iguales cantidades de agua.

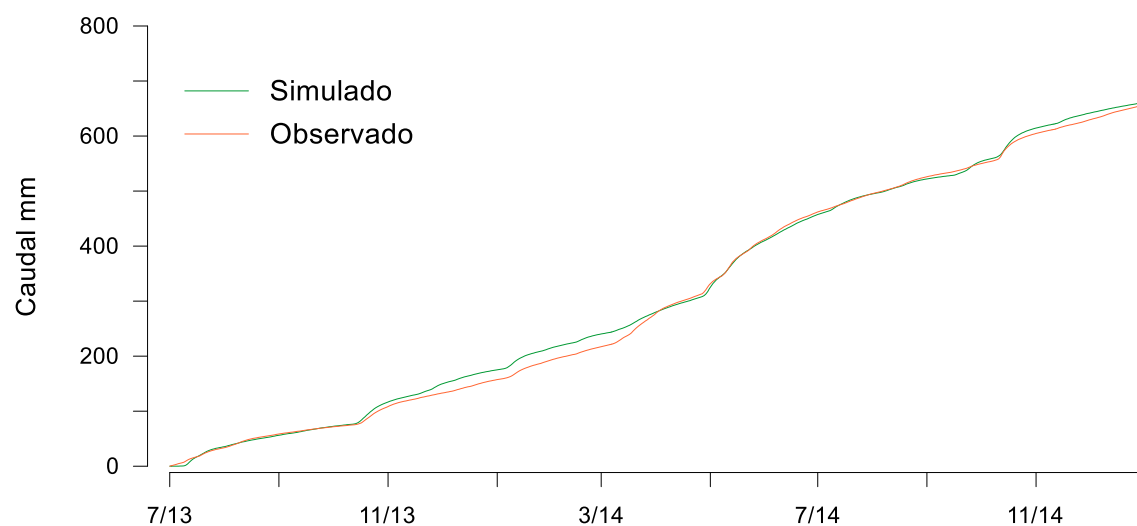


Figura 7. Caudal acumulado observado y simulado para el periodo de calibración.

3.3 Validación

Para el periodo de validación (julio-2015 a junio-2016) se obtuvo una E de 0.81 y un error de 6.73% en cuanto a volumen de descarga.

El caudal del flujo base mínimo es de 86 l s^{-1} y el máximo de 417 l s^{-1} con una media de 234 l s^{-1} . El caudal de escorrentía superficial mínimo es de 0 l s^{-1} y el máximo de 787 l s^{-1} con una media de 134 l s^{-1} como se observa en la figura 8.

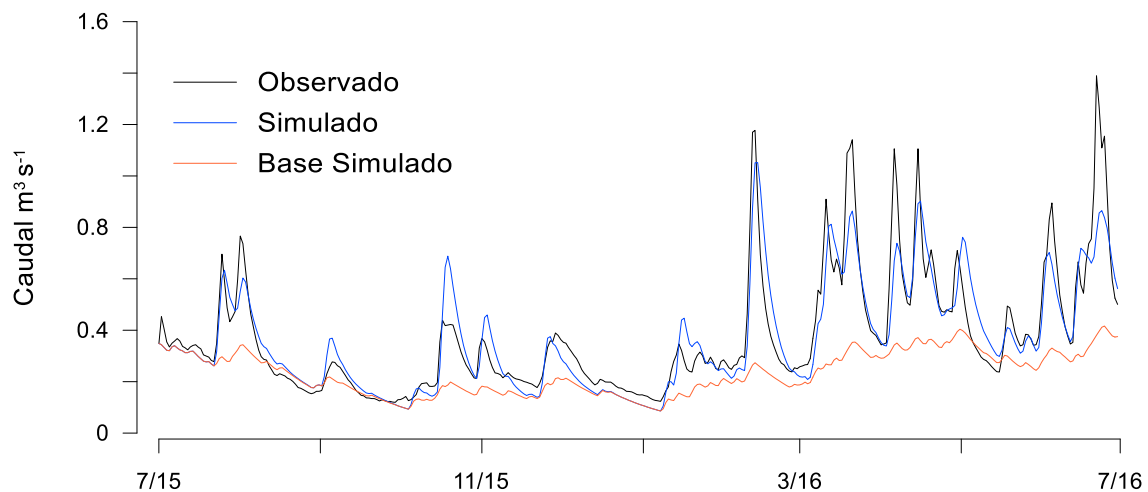


Figura 8. Validación, flujo simulado vs flujo observado.

En cuanto a volúmenes simulados tenemos que la infiltración corresponde al 82% del total de lluvia mientras que lo que se retiene en la superficie de plantas y suelo es solo el 18%. La escorrentía superficial corresponde al 36% del flujo total mientras que el flujo base al 64% como se muestra en la tabla 8. El coeficiente de escorrentía simulado es de 0.49.



Tabla 8. Volúmenes simulados para el periodo de validación.

| | | | |
|-----------------------------------|-------------|---|-------------|
| Volumen Precipitación (mm) | 1082 | Volumen de Descarga (mm) | 532 |
| Volumen de infiltración (mm) | 885 | Volumen de Escorrentía Superficial (mm) | 194 |
| Volumen de retención (mm) | 197 | Volumen de Flujo Base (mm) | 338 |
| Coeficiente de Escorrentía | | | 0.49 |

En la figura 9 observamos que el caudal acumulado simulado es similar al caudal acumulado observado por lo que sabemos que a través del tiempo se están descargando iguales cantidades de agua, congruente con la calibración.

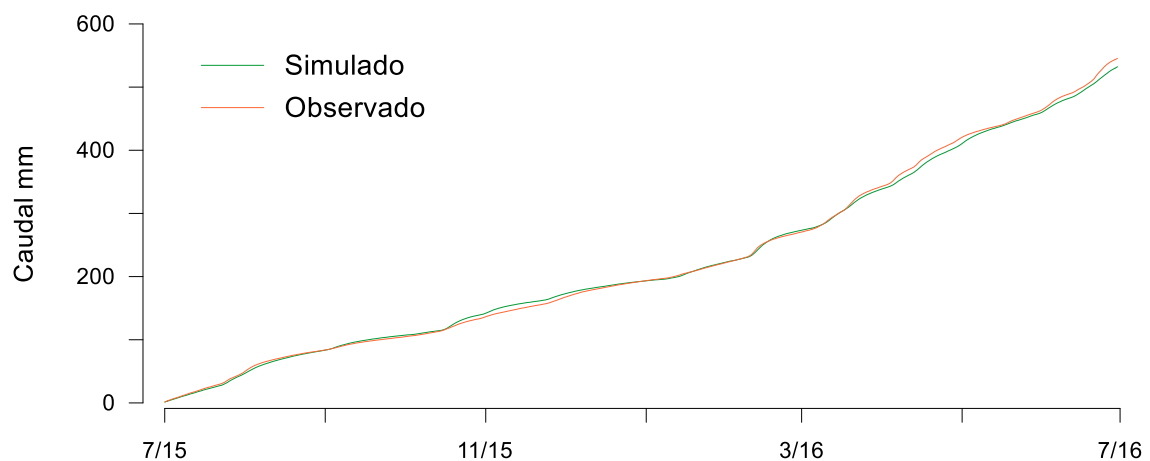


Figura 9. Caudal acumulado observado y simulado para el periodo de validación.



4. Conclusiones y Recomendaciones

De la modelación matemática realizada en este estudio y con los resultados obtenidos se puede concluir lo siguiente:

- Que la mayor parte del agua se infiltra en el suelo gracias a su gran capacidad de percolación y las bajas intensidad de lluvia, esto se ratifica con otros estudios en zonas de páramo.
- Que la mayor parte del flujo corresponde a flujo sub-superficial, es decir, a flujo base; y que ésta es retenida en el suelo por aproximadamente 42 días antes de salir a los cauces naturales.
- Una fortaleza del modelo es su capacidad para simular apropiadamente la escorrentía superficial de la cuenca. Esto se evidencia al comparar las curvas de caudal acumulado observado y simulado, y los coeficientes de escorrentía obtenidos en otros estudios en zonas similares.
- Una debilidad del modelo es su capacidad para simular con mayor precisión los caudales máximos, teniendo sub-estimaciones y sobre-estimaciones en el periodo de análisis. En general, el HEC-HMS presenta una sub-estimación de los picos, que es más evidente en el periodo de validación. Esto podría deberse a (i) la cuenca de estudio presenta condiciones (p.e. geográficas, morfológicas, climáticas) y características (p.e. páramo) muy especiales para las cuales el modelo no fue desarrollado, (ii) existe un mayor error e incertidumbre en la estimación de los caudales máximos observados usando la curva de descarga en la estación de nivel. A pesar de esto, el HEC-HMS tiene un rendimiento aceptable para simular los procesos hidrológicos en la zona de estudio.



Universidad de Cuenca

- Como recomendación e investigación futura se propone usar ambas capas sub-superficiales del suelo ya que en esta investigación se usó solamente una y comparar los resultados para saber si es recomendable usar una o ambas capas. El uso de dos capas sería necesario para evaluar si se obtienen valores más realistas de Soil Storage. También se podría intentar obtener mejores resultados de los caudales máximos.
- Otra recomendación es realizar el trabajo nuevamente en una cuenca con similares condiciones meteorológicas y tipos de suelos, pero con diferente cobertura vegetal. De esta manera se podrían comparar los valores calibrados obtenidos y estudiar cómo podría un cambio de uso de suelo afectar a los caudales de escorrentía superficial y flujo base.



5. Bibliografía

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M., & Ab, W. (1998). Allen_FAO1998, 1–15.
- Beniston, M. (2003). Climatic Change in Mountain Regions: A Review of Possible Impacts. *Climate Variability and Change in High Elevation Regions: Past, Present & Future SE - 2*, 15, 5–31. https://doi.org/10.1007/978-94-015-1252-7_2
- Bennett, T. H. (1998). *Development and Application of a Continuous Soil Moisture Accounting Algorithm for the Hydrologic Engineering Center Hydrologic Modeling System (HEC-HMS)*. Retrieved from <https://books.google.com.ec/books?id=D6JaNwAACAAJ>
- Buytaert, W., & Beven, K. (2011). Models as multiple working hypotheses: Hydrological simulation of tropical alpine wetlands. *Hydrological Processes*, 25(11), 1784–1799.
- Buytaert, W., & Bievre, B. De. (2012). Water for cities: The impact of climate change and demographic growth in the tropical Andes. *Water Resources Research*, 48(8), 1–13. <https://doi.org/10.1029/2011WR011755>
- Buytaert, W., Célleri, R., De Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., & Hofstede, R. (2006). Human impact on the hydrology of the Andean p??ramos. *Earth-Science Reviews*, 79(1–2), 53–72. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.06.002>
- Buytaert, W., Celleri, R., Willems, P., Bièvre, B. De, & Wyseure, G. (2006). Spatial and temporal rainfall variability in mountainous areas: A case study from the south Ecuadorian Andes. *Journal of Hydrology*, 329(3–4), 413–421. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.02.031>
- Buytaert, W., Cuesta-Camacho, F., & Tobón, C. (2011). Potential impacts of



climate change on the environmental services of humid tropical alpine regions. *Global Ecology and Biogeography*, 20(1), 19–33.

<https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00585.x>

Buytaert, W., Deckers, J., & Wyseure, G. (2006). Description and classification of nonallophanic Andosols in south Ecuadorian alpine grasslands (páramo). *Geomorphology*, 73(3–4), 207–221.

<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.06.012>

Célleri, R., & Feyen, J. (2009). The Hydrology of Tropical Andean Ecosystems: Importance, Knowledge Status, and Perspectives. *Mountain Research and Development*, 29(4), 350–355. <https://doi.org/10.1659/mrd.00007>

Córdova, M., Carrillo-Rojas, G., Crespo, P., Wilcox, B., & Célleri, R. (2015). Evaluation of the Penman-Monteith (FAO 56 PM) Method for Calculating Reference Evapotranspiration Using Limited Data. *Mountain Research and Development*, 35(3), 230–239. <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-14-0024.1>

Córdova, M., Célleri, R., Shellito, C. J., Orellana-Alvear, J., Abril, A., & Carrillo-Rojas, G. (2016). Near-surface air temperature lapse rate over complex terrain in the Southern Ecuadorian Andes: implications for temperature mapping. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 48(4), 673–684. <https://doi.org/10.1657/AAAR0015-077>

Crespo, P., Célleri, R., Buytaert, W., Feyen, J. A. N., Iñiguez, V., Borja, P., & Bievre, B. D. E. (2010). Land use change impacts on the hydrology of wet Andean páramo ecosystems, (April 2009).

Crespo, P. J., Feyen, J., Buytaert, W., Bücker, A., Breuer, L., Frede, H. G., & Ramírez, M. (2011). Identifying controls of the rainfall-runoff response of small catchments in the tropical Andes (Ecuador). *Journal of Hydrology*, 407(1–4), 164–174. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.07.021>



- Erwin, K. L. (2009). Wetlands and global climate change: The role of wetland restoration in a changing world. *Wetlands Ecology and Management*, 17(1), 71–84. <https://doi.org/10.1007/s11273-008-9119-1>
- Farley, K. A., Bremer, L. L., Harden, C. P., & Hartsig, J. (2013). Changes in carbon storage under alternative land uses in biodiverse Andean grasslands: Implications for payment for ecosystem services. *Conservation Letters*, 6(1), 21–27. <https://doi.org/10.1111/j.1755-263X.2012.00267.x>
- Feldman, A. D. (2000). Hydrologic Modeling System Technical Reference Manual, (March).
- Harden, C. P., Hartsig, J., Farley, K. a., Lee, J., Bremer, L. L., Crespo, P., ... Cooper, M. (2013). Effects of Land-Use Change on Water in Andean Páramo Grassland Soils. *Annals of the Association of American Geographers*, 103(4), 375–384. <https://doi.org/10.1659/mrd.00007>
- IUSS Working Group WRB. (2014). *World reference base for soil resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106.* <https://doi.org/10.1017/S0014479706394902>
- Molnar, P. (2011). Calibration. Watershed Modelling, SS 2011. *Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management, ETH Zürich, Switzerland.*
- Mosquera, G. M., Célleri, R., Lazo, P. X., Vach??, K. B., Perakis, S. S., & Crespo, P. (2016). Combined use of isotopic and hydrometric data to conceptualize ecohydrological processes in a high-elevation tropical ecosystem. *Hydrological Processes*, 30(17), 2930–2947. <https://doi.org/10.1002/hyp.10927>
- Mosquera, G. M., Lazo, P. X., Célleri, R., Wilcox, B. P., & Crespo, P. (2015). Runoff from tropical alpine grasslands increases with areal extent of



wetlands. *Catena*, 125, 120–128.

<https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.10.010>

Mosquera, G. M., Segura, C., Vaché, K. B., Windhorst, D., Breuer, L., & Crespo, P. (2016). Insights into the water mean transit time in a high-elevation tropical ecosystem. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(7), 2987–3004. <https://doi.org/10.5194/hess-20-2987-2016>

Podwojewski, P., Poulenard, J., Zambrana, T., & Hofstede, R. (2002). Overgrazing effects on vegetation cover and properties of volcanic ash soil in the páramo of Llangahua and La Esperanza (Tungurahua, Ecuador). *Soil Use and Management*, 18(1). <https://doi.org/10.1079/SUM2002100>

Poulenard, J., Michel, J. C., Bartoli, F., Portal, J. M., & Podwojewski, P. (2004). Water repellency of volcanic ash soils from Ecuadorian páramo: Effect of water content and characteristics of hydrophobic organic matter. *European Journal of Soil Science*, 55(3), 487–496. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2004.00625.x>

Poulenard, J., Podwojewski, P., Janeau, J. L., & Collinet, J. (2001). Runoff and soil erosion under rainfall simulation of Andisols from the Ecuadorian Páramo: Effect of tillage and burning. *Catena*, 45(3), 185–207. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(01\)00148-5](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(01)00148-5)

Raes, D. (2009). The ETo Calculator Table of Contents - Reference Manual, 1–38.

Roa-García, M. C., Brown, S., Schreier, H., & Lavkulich, L. M. (2011). The role of land use and soils in regulating water flow in small headwater catchments of the Andes. *Water Resources Research*, 47(5). <https://doi.org/10.1029/2010WR009582>

Scharffenberg, W. (2015). Hydrologic Modeling System User s Manual, (July).



Thiessen, A. H. (1911). Precipitation averages for large areas. *Monthly Weather Review*, 39(7), 1082–1089.

Vásconez, P., & Hofstede, R. (2006). Los páramos ecuatorianos. *Botánica Económica de Los Andes Centrales*, 91–109. Retrieved from [http://www.beisa.dk/Publications/BEISA Book pdfer/Capitulo 06.pdf](http://www.beisa.dk/Publications/BEISA%20Book%20pdf/Capitulo%2006.pdf)

Vuille, M. (2013). Climate Change and Water Resources in the Tropical Andes. *IDB Technical Note*, (515), 29. Retrieved from <http://link.springer.com/article/10.1007/s00382-014-2114-8>